VYSOKONAPĚŤOVÉ ZKUŠEBNICTVÍ

Diagnostika výkonových transformátorů (tlumivek) a kabelů

Výkonové transformátory

- Hlavní části výkonového transformátoru jsou
  - Průchodky
  - MTP na průchodce
  - Izolační látka
  - Přívody
  - Přepínač odboček
  - Vinutí
  - Magnetický obvod

Výkonové transformátory

- S ohledem na velké finanční náklady je požadavek na nedestruktivní zkoušky!
- Při průběhu a vyhodnocení většiny zkoušek se musí brát ohled na předchozí stav transformátoru; např.:
  - Rozložení teploty uvnitř vinutí a případně v oleji
  - Stav přepínače odboček
  - Zbytková magnetizace jádra

Výčet hlavních diagnostických metod pro výkonové transformátory (tlumivky)

- Odpor vinutí
- Izolační odpor a činitel polarizace
- Ztrátový činitel a kapacita vinutí
- Poměr kapacit C_2/C_{50}
- Napěťové zkoušky
  - Indukovaným napětím
  - Výdržným napětím
  - Spínacím a atmosférickým impulzem
  - Měření částečných výbojů
- Metody pro detekci posunu vinutí
  - Metoda nízkonapěťových impulzů (LVIM)
  - Metoda frekvenčních charakteristik (SFRA)

Odpor vinutí

- Odpor vinutí R_f se měří stejnosměrným napětím (max. $0{,}2U_n$) na zcela odpojeném transformátoru (odpojen sekundár i primár)
- Vinutí musí být teplotně ustálené na teplotě okolí (cca 20 °C)
- Odpor se měří přímo ohmovou metodou pro malé odpory nebo pomocí můstkové metody
- U zapojení s vyvedeným uzlem (uzemněná hvězda) se měří postupně fáze vůči zemi (fázové odpory)

Odpor vinutí

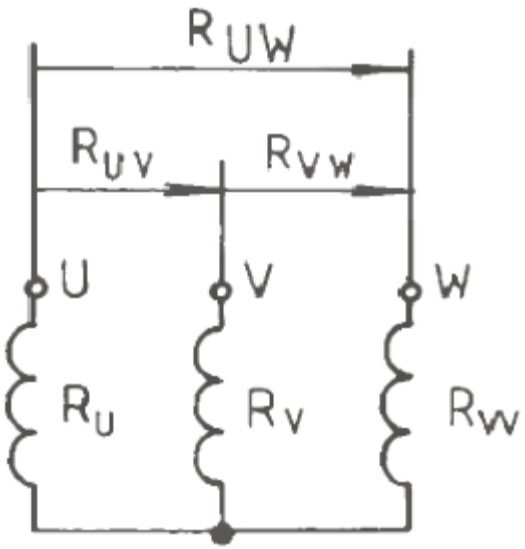
- U zapojení bez vyvedeného uzlu se měří mezi dvěma fázovými svorkami (sdružené odpory)
  - u zapojení do hvězdy: sériově jsou spojena dvě vinutí
  - u zapojení do trojúhelníku: jedno vinutí je paralelně připojeno ke dvěma sériově spojeným vinutím

Výpočet střední hodnoty odporu jedné fáze:

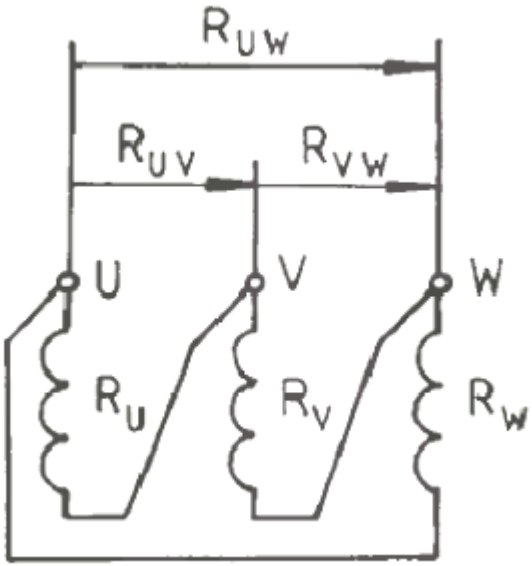
$$R_s = \frac{1}{6}(R_{UV} + R_{VW} + R_{UW})$$

Odpor vinutí

Zapojení do hvězdy:



Zapojení do trojúhelníku:



Jsou-li mezifázová měření stejná, lze vypočíst fázový odpor jednoho vinutí (u hvězdy, u trojúhelníku):

$R_f = 0{,}5R_{UV}$ $R_f = 1{,}5R_{UV}$

Izolační odpor a činitel polarizace

- Izolační odpor se měří stejnosměrným napětím (min. 500 V)
  - V současné době je pro výkonové transformátory preferováno měřící napětí 2,5 kV, kdy je při měření vůči zemi uzemněn kladný pól
  - Měřící napětí by nemělo překročit jmenovitou hodnotu napětí stroje
- Měření se provádí pomocí klasické můstkové metody, dnes většinou přístroji pro přímé měření odporu

Izolační odpor a činitel polarizace

- Pro vyhodnocení izolačního odporu musí být měření dostatečně dlouhé – pro odeznění přechodných jevů
- Během měření se dvakrát odečítá absorpční proud v časech 15 a 60 s (zjištění i_{p15} a i_{p60})
  - Absolutní velikost izolačního odporu R_{iz60} je daná absorpčním (svodovým) proudem v čase 60 s a přiloženým zkušebním napětím

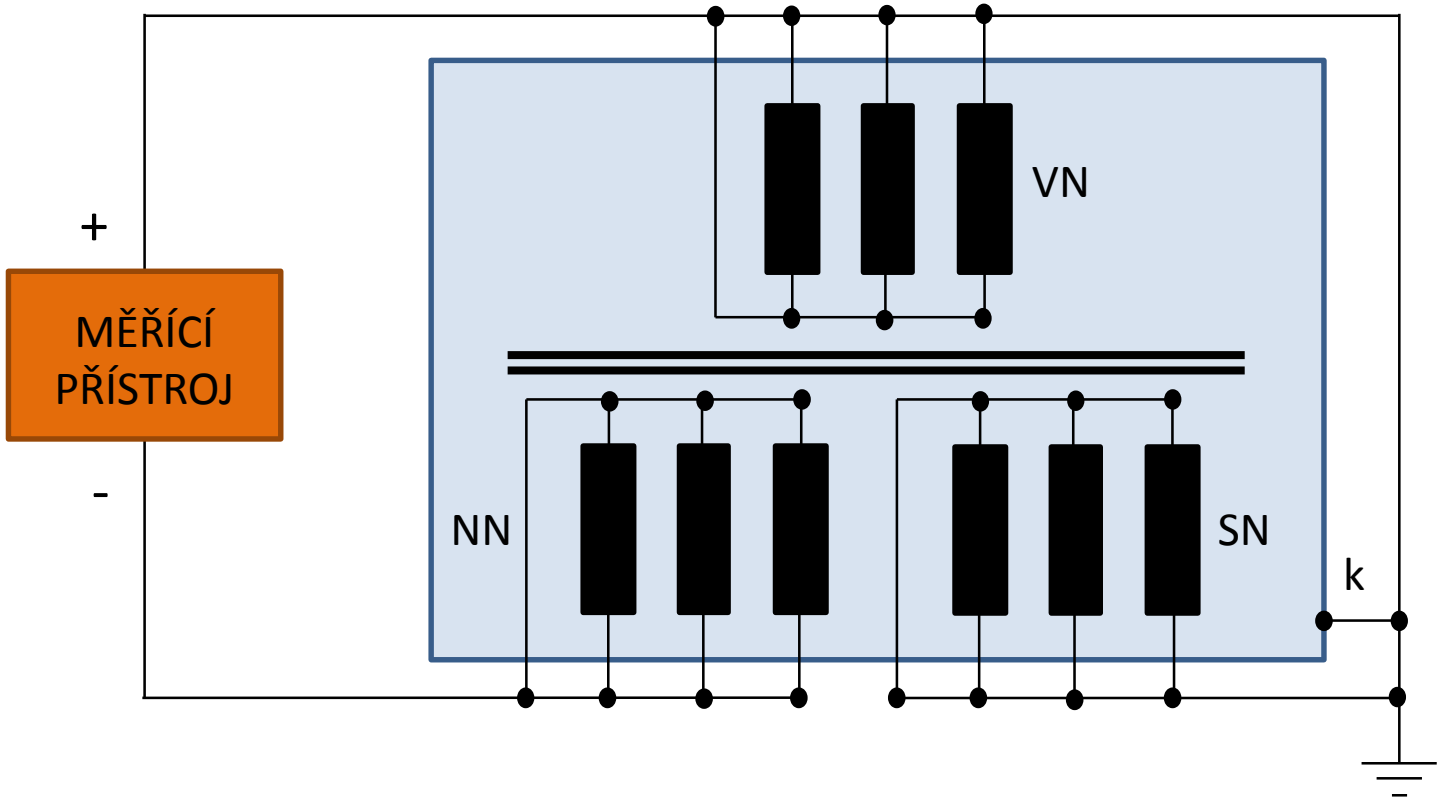
Izolační odpor a činitel polarizace

- U strojů s jedním vinutím (tlumivky) se měří stav mezi vinutím a kostrou
- U strojů se dvěma nebo třemi vinutími se měří dle následující tabulky (k = kostra, nádoba):

Transformátory s dvojím vinutím		**Transformátory s trojím vinutím**	
Měřené vinutí	*Uzemněno*	*Měřené vinutí*	*Uzemněno*
VN	NN+k	VN	SN+NN+k
NN	VN+k	SN	VN+NN+k
VN+NN	k	NN	VN+SN+k
		VN+SN	NN+k
		VN+SN+NN	k

Izolační odpor a činitel polarizace

- Příklad zapojení pro měření R_{iz} u trojvinuťového stroje v zapojení NN:(VN+SN+k)



Izolační odpor a činitel polarizace

- Obě naměřené hodnoty jsou dále potřebné pro určení činitele polarizace p_{i1} *(-)*

$$p_{i1} = i_{p15}/i_{p60}$$

- Dále se zjišťuje časová konstanta stroje τ
  - Není závislá na velikosti stroje – dovoluje objektivně porovnávat různé stroje vzájemně mezi sebou

$$\tau = R_{iz60} \cdot C_{50}$$

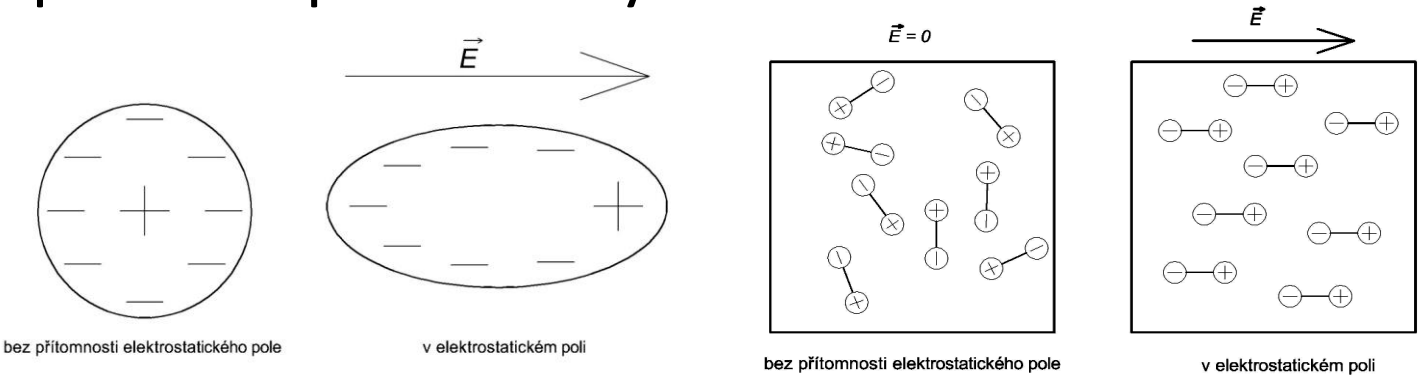
kde C_{50} je kapacita zařízení při frekvenci 50 Hz

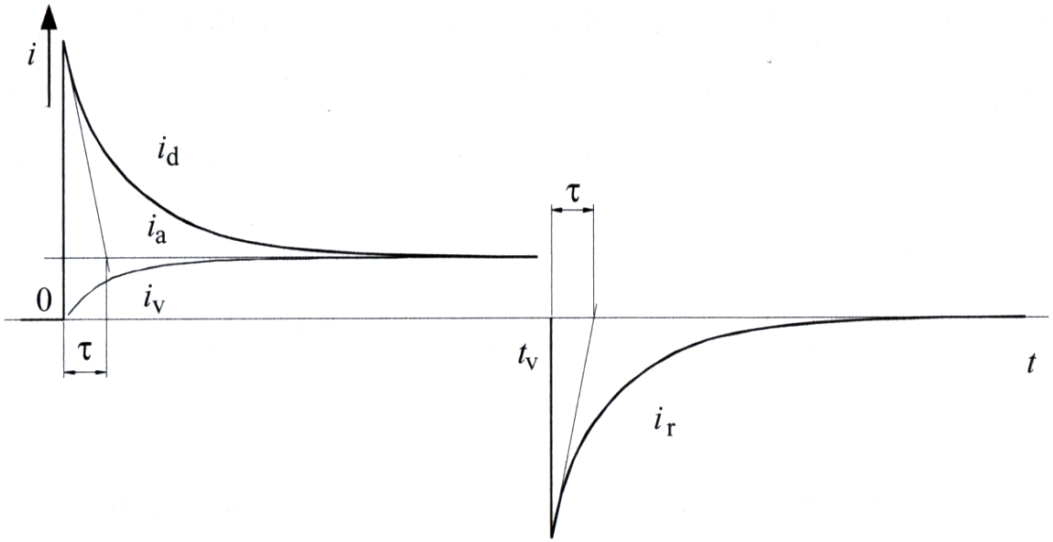
Polarizace dielektrik

- Odvíjí se od ní hodnocení kvality dielektrik a izolantů
  - Když vložíme dielektrikum do el. pole začnou se nosiče el. náboje natáčet či posouvat z neutrální polohy do směru působení daného el. pole
  - Z počátku vzniká přechodná složka proudu, která je vyvolána spotřebou energie při polarizaci
  - Tento mechanismus je spojen s relativní permitivitou ε_r materiálu vloženého do el. pole (je tím určitým způsobem vyjádřena schopnost polarizace daného materiálu po vložení do el. pole)

Polarizace dielektrik

– Ve zpolarizovaném dielektriku v el. poli bude protékat pouze malý svodový (vodivostní) proud





Ztrátový činitel tg δ

Vztah mezi el. indukcí a intenzitou el. pole:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E}$$

Vztahy platící ve střídavém elektrickém poli (časově závislé):

$$\vec{D}(t) = \vec{D}_m \cdot e^{j(\omega t - \delta)}$$

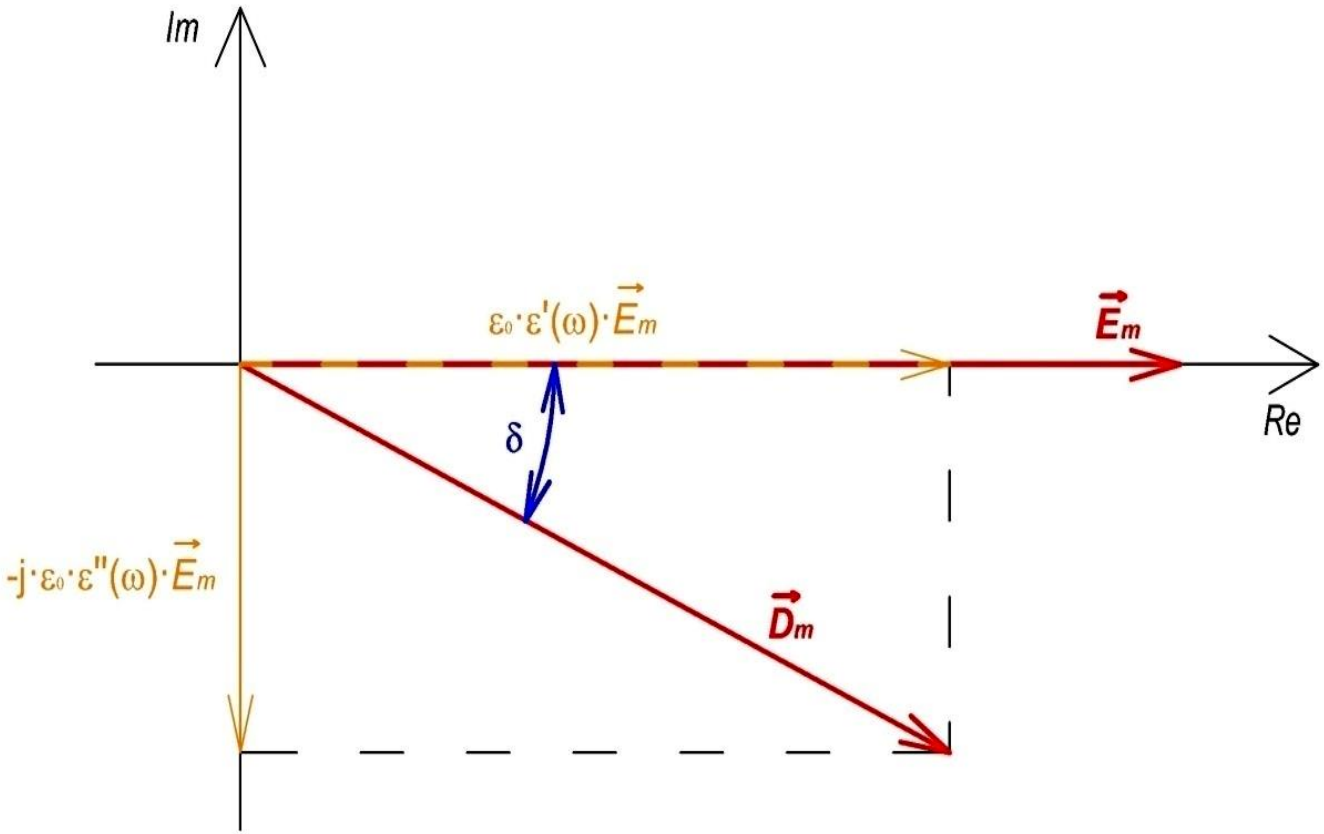
$$\vec{E}(t) = \vec{E}_m \cdot e^{j(\omega t)}$$

$$\varepsilon_r{}^*(j\omega) = \varepsilon_r'(\omega) - j\,\varepsilon_r''(\omega)$$

Ztrátový činitel tg δ

Okamžitý vztah mezi D a E ve střídavém el. poli:

$$\vec{D}_m \cdot e^{-j\delta} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r{}^*(j\omega) \cdot \vec{E}_m$$

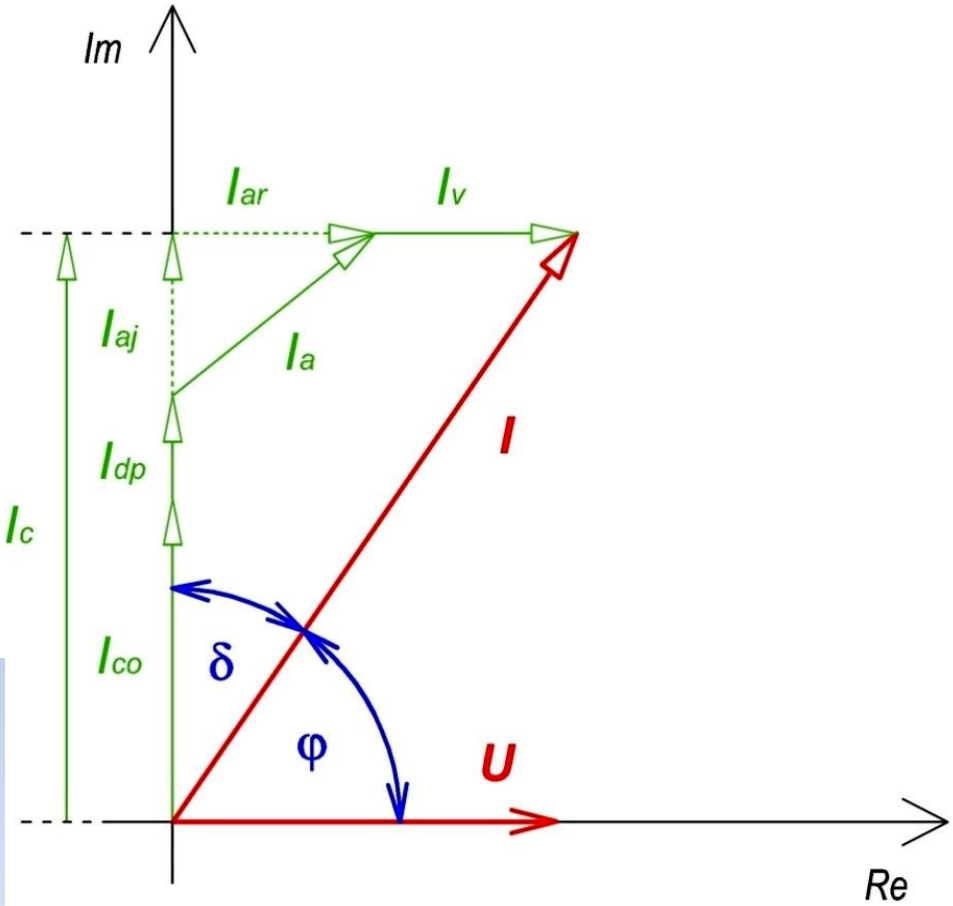


Ztrátový činitel tg δ

- Zpoždění *E* za *D* vytváří urychlení proudu za napětím
- Proud má dvě části
  - Reálnou ztrátovou
  - Imaginární bezztrátovou
- Ztrátový činitel tg δ:

$$\delta = 90° - \varphi$$

$$tg\ \delta = \frac{\varepsilon_r''(\omega)}{\varepsilon_r'(\omega)} = \frac{I_{Re}}{I_{Im}}\ (-)$$



Ztrátový činitel tg δ

- Úhel δ je dán velikostí rozdílu reálného dielektrika od ideálního
- V praxi ztrátový činitel *tg* δ charakterizuje činné ztráty polarizací v izolaci
- Slouží k posouzení stavu izolace (nová/zestárlá/navlhlá) a omezenou měrou reaguje i na vznik částečných výbojů
- Odhalení částečných průrazů mezi vrstvami kapacitních průchodek

Měření tg δ a kapacity při 50 Hz

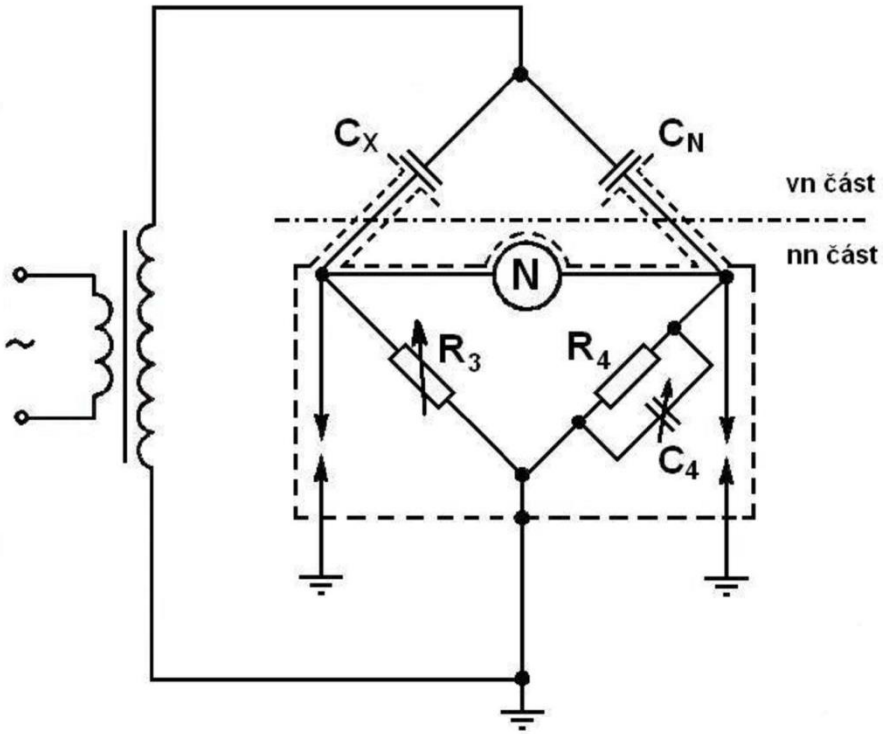
- Měření se provádí střídavým napětím z řady 0,5-1-2-5 -10 kV podle izolační hladiny měřeného zařízení
- Měří se obě polarity vinutí
- Měření se realizuje při při teplotě stroje 30 až 20 °C
  - u strojů s olejem lze měřit až po ustálení poměrů ve stroji, tj. nejméně 3 hodiny po vypnutí čerpadel

Měření tg δ a kapacity při 50 Hz

- Nejčastěji se měří pomocí můstkových metod (Scheringův můstek – ruční/automatický)
- Pomocí R_3 a C_4 se vyrovná hledaná kapacita C_x
- C_N je kapacitní normál

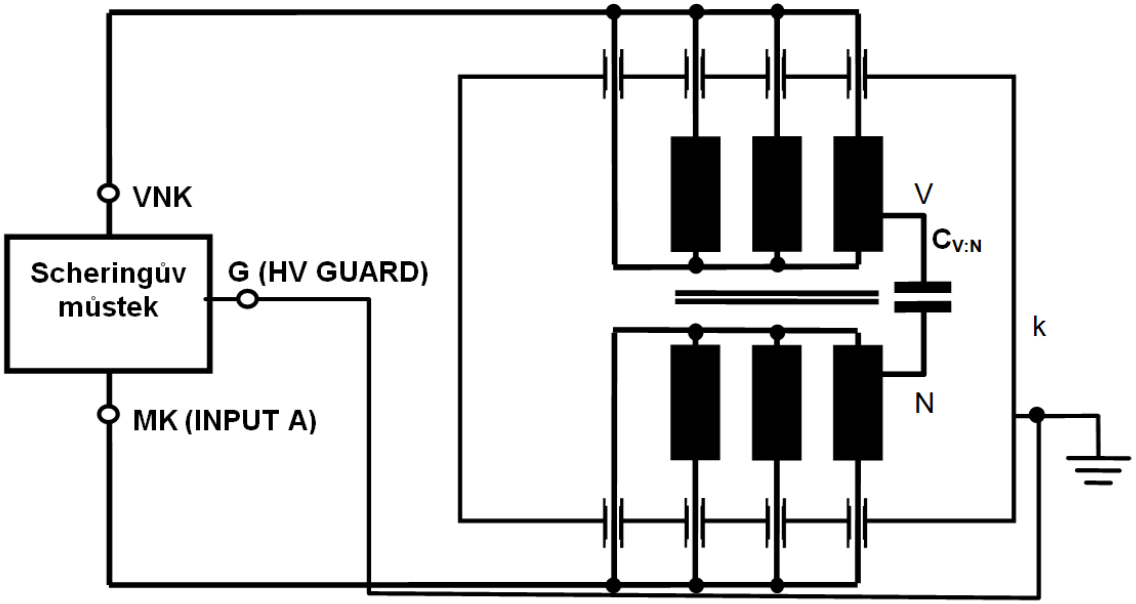
$$tg\ \delta_x = \omega C_4 R_4$$

$$C_x = C_N \frac{R_4}{R_3}$$



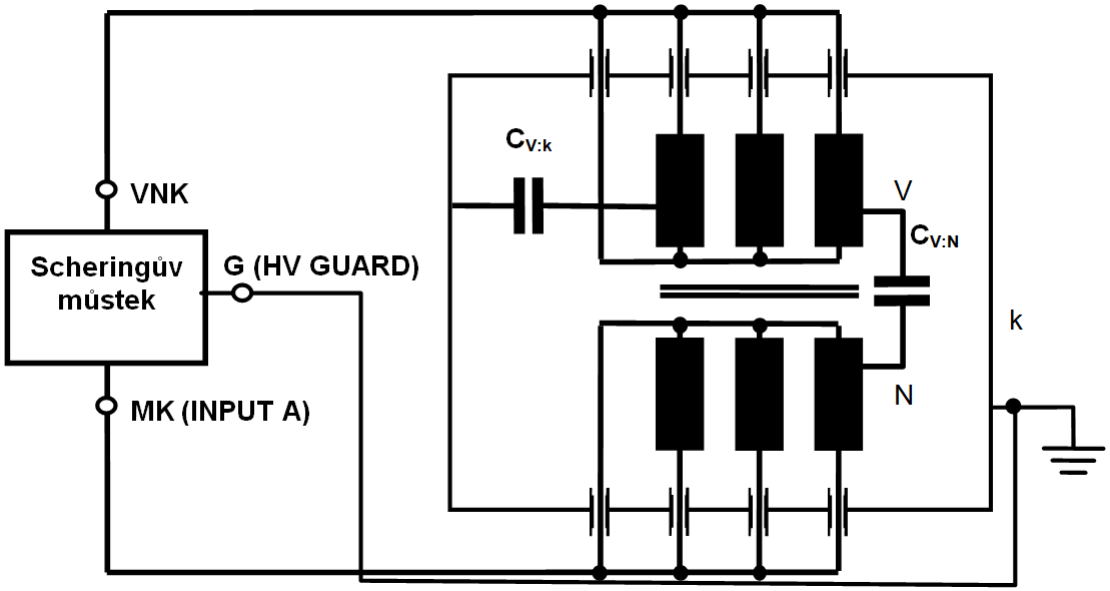
Měření tg δ a kapacity při 50 Hz

- Dvojvinuťový transformátor zapojení UST (Ungrounded Specimen Test)
  - pro měření na neuzemněném objektu



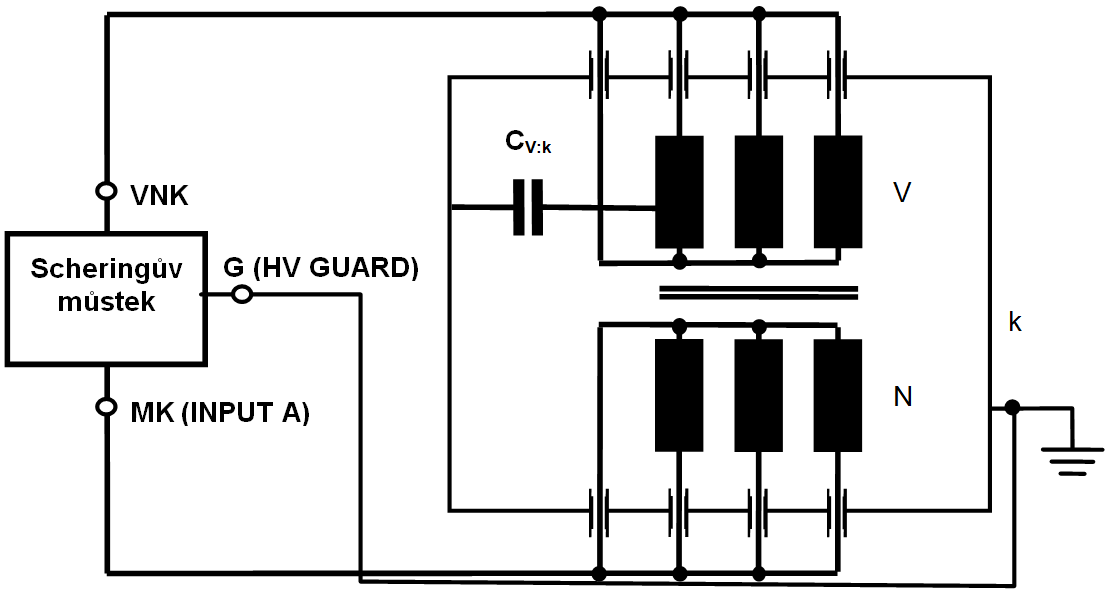
Měření tg δ a kapacity při 50 Hz

- Dvojvinuťový transformátor zapojení GST (Grounded Specimen Test)
  - pro měření na uzemněném objektu
  - vinutí N je můstkem spojeno s kostrou



Měření tg δ a kapacity při 50 Hz

- Dvojvinuťový transformátor zapojení GSTg (Grounded Specimen Test with guarding)
  - pro měření na uzemněném objektu
  - vinutí N je na nulovém potenciálu virtuálně



Měření tg δ a kapacity při 50 Hz

- Výsledné hodnoty ztrátového činitele a kapacity se pak stanoví z naměřených hodnot při obou polaritách podle vztahu:

$$tg\ \delta = \frac{tg\ \delta_1 \cdot C_1 + tg\ \delta_2 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$$

$$C = \frac{C_1 + C_2}{2}$$

kde index jedna označuje měření při základní polaritě a index dva při opačné polaritě

Měření poměru kapacit C_2/C_{50}

- Slouží ke zjišťování míry navlhnutí izolačních systémů olejem plněných transformátorů
- Využívá se závislosti relativní permitivity na frekvenci => měří se podíl kapacity při 2 Hz ke kapacitě při 50 Hz
- Kapacita suché izolace se v závislosti na frekvenci mění jen velmi málo, pokud navlhne mění se naopak výrazně

Měření poměru kapacit C_2/C_{50}

- K měření se používá střídavé napětí o doporučené hodnotě 100 V
- Nejdříve se připojí napětí o frekvenci 50 Hz a po minutě se změří ustálená hodnota kapacity
- Poté se vinutí odpojí od zdroje a uzemní se na dobu min. 1 min (vybití kapacit)
- Totéž se poté opakuje pro frekvenci 2 Hz

Měření poměru kapacit C_2/C_{50}

- V tabulce jsou uvedeny mezní poměry pro různé teploty vinutí (ideální poměr je 1)

Teplota vinutí (°C)	10	20	30	40	50
Poměr C_2/C_{50}	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5

- Tyto série měření (určení poměru kapacit) se provádí pro všechny různé typy zapojení svorek transformátoru shodně jako u měření izolačního odporu
- Mezi změnou zapojení se vždy nechají kapacity vybíjet min. 3 min

Výdržné a impulzní napěťové zkoušky

- Kontrola a ověření elektrické pevnosti izolace vinutí vůči zemi a vůči ostatním vinutím, podélné izolace daného vinutí a vývodů napětí vůči uzemněným částem zařízení
- Viz přednáška na napěťové zkoušky!
- Zde jen upřesnění jednotlivých zkoušek pro výkonové transformátory
- Zkoušky se musí provádět na kompletně smontovaných transformátorech

Výdržné a impulzní napěťové zkoušky

- Zkouška výdržným přiloženým AC napětím
  - Napětí generováno cizím 1f zdrojem
  - Přikládá se mezi zkratované svorky měřeného vinutí a zemi
  - Ostatní vinutí jsou spolu s kostrou a nádobou transformátoru uzemněna
  - Hodnota zkušebního napětí je vrcholová hodnota dělená $\sqrt{2}$ (měří se vrcholová hodnota)
  - Plné zkušební napětí musí být přivedeno po dobu min. 60 s

Výdržné a impulzní napěťové zkoušky

- Zkouška atmosférickým impulzem
  - Zkouší se mezi jednotlivými vinutími navzájem, mezi jednotlivými vinutími a uzemněnými částmi (kostra, nádoba, …), mezi jednotlivými závity, vrstvy vinutí a mezi jednotlivými cívkami vinutí
  - Izolační hladina (zkušební napětí) se volí dle druhu zařízení a typu sítě, kde bude zařízení pracovat (hodnoty v tabulkách)
  - Běžně záporná polarita impulzu

Výdržné a impulzní napěťové zkoušky

- Zkouška spínacím impulzem
  - Hlavně se jím kontroluje kvalita vnitřní izolace
  - Měří se indukované napětí v měřeném vinutí po přivedení impulzu na vinutí vyšší nebo nižší hladiny
  - Tvar vlny se liší od normalizovaného 250/2500 μs – důvodem je sycení jádra magnetického obvodu
  - Doba čela T_p min. 100 μs, doba maxima T_{90} min. 200 μs, doba trvání impulzu T_2 min. 500 μs
  - Běžně záporná polarita impulzu

Zkouška indukovaným napětím

- Speciální napěťová výdržná zkouška pro transformátory
- Ověřuje pevnost každé fázové svorky a k ní připojená vinutí vůči zemi a vůči ostatním vinutím
- Rozlišuje se pro transformátory do a od jmenovité napěťové hladiny 75 kV
- Často je prováděná společně se zkouškou měření částečných výbojů!

Zkouška indukovaným napětím

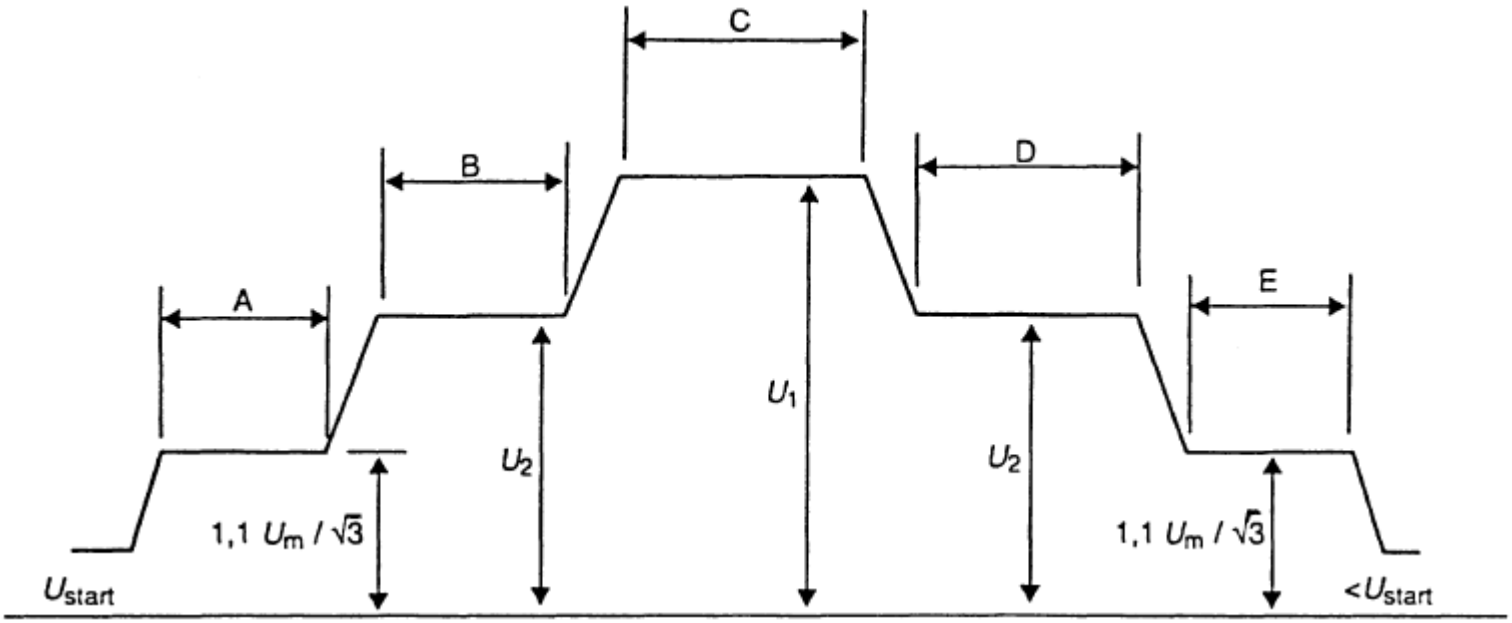
- Hodnota zkušebního napětí je vrcholová hodnota dělená $\sqrt{2}$ (měří se vrcholová hodnota)
- Na 3f TRF se přivádí 3f symetrické měřící napětí
- Vyvedené nulové svorky musí být vždy uzemněné
- Zkouší se obyčejně na frekvencích do dvojnásobku síťové (jinak je nutná úprava časů měření)

Zkouška indukovaným napětím

- Dělí se
  - Krátkodobá zkouška indukovaným AC napětím (ACSD) u TRF s plně izolovaným nulovým bodem vinutí vn
    - Napětí podél vinutí cca dvojnásobek U_n
  - Krátkodobá zkouška indukovaným AC napětím (ACSD) u TRF s redukovaně izolovaným nulovým bodem vinutí vn
    - Napětí podél vinutí max. U_n => úpravy zapojení měřícího obvodu!
  - Dlouhodobá zkouška indukovaným AC napětím (ACLD)

Zkouška indukovaným napětím

- Průběh zkoušky při ACSD

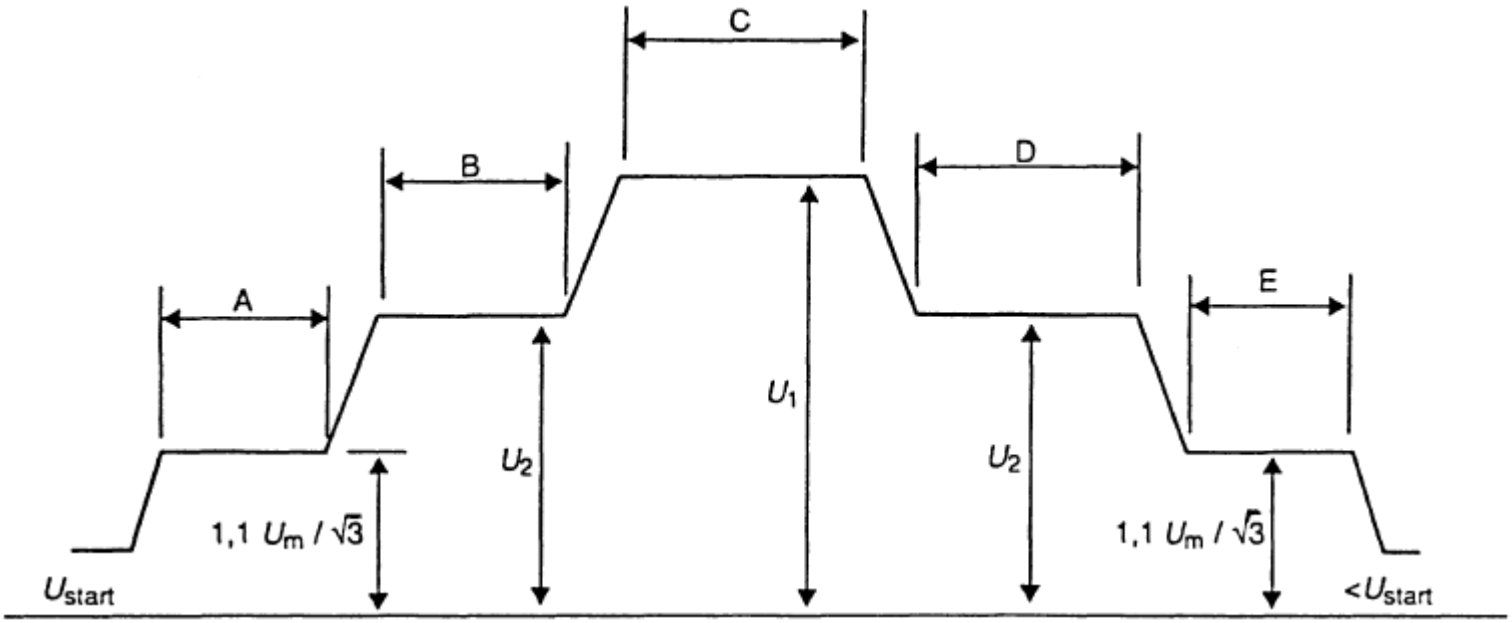


U_m – jmenovité napětí
Napětí v diagramu jsou vůči zemi:
U_1 = *určení dle tab.*
$U_2 = 1{,}3\ U_m/\sqrt{3}$

C = zkušební doba
A, B, E = 5 min
D ≥ 5min

Zkouška indukovaným napětím

- Průběh zkoušky při ACLD



U_m – jmenovité napětí

Napětí v diagramu jsou vůči zemi:

$U_1 = 1{,}7\ U_m/\sqrt{3}$

$U_2 = 1{,}5\ U_m/\sqrt{3}$

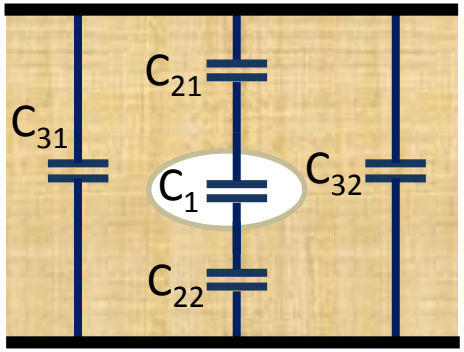
C = zkušební doba

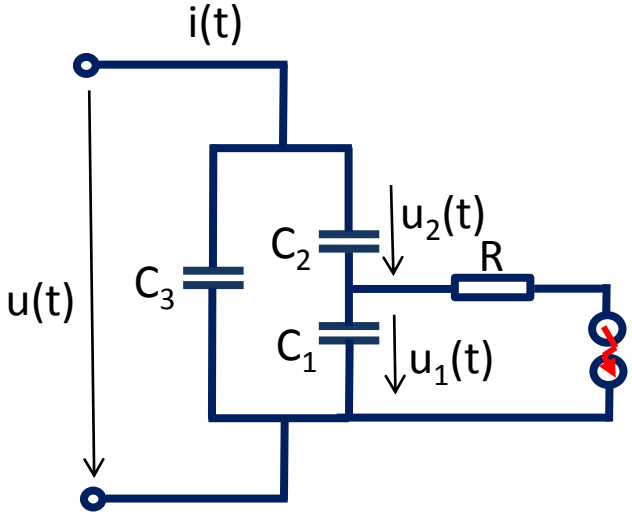
A, B, E = 5 min

D = 60 min pro Um ≥ 300 kV / 30 min pro Um < 300 kV

Částečné výboje

- Náhradní model pro vnitřní částečné výboje

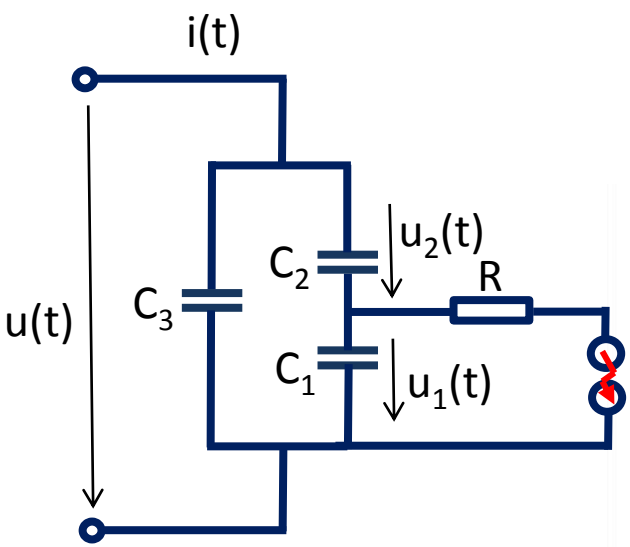


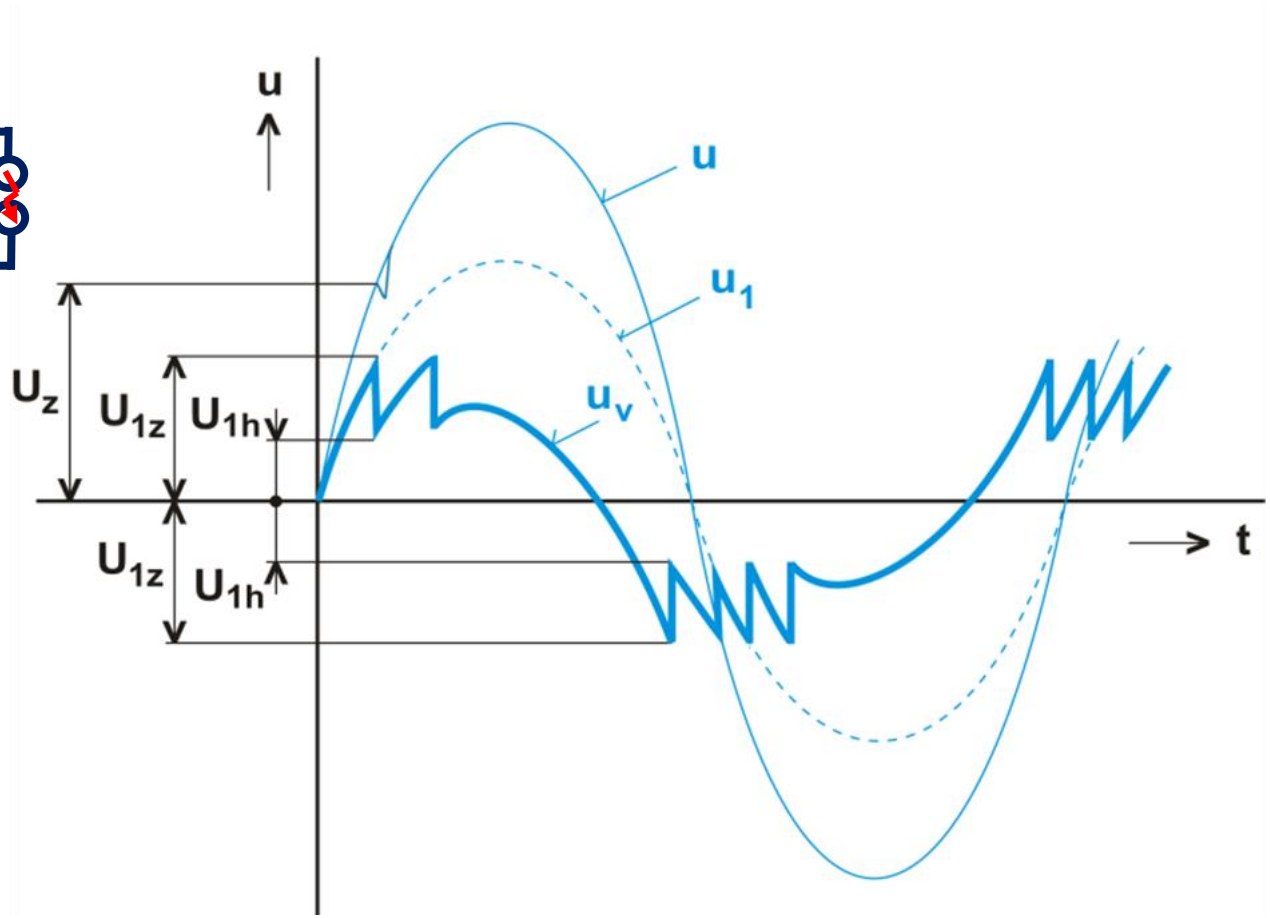


Napětí na dutince (kondenzátoru C_1) lze vyjádřit jako:

$$u_1(t) = \frac{C_2}{C_1 + C_2}\, u(t)$$

Částečné výboje

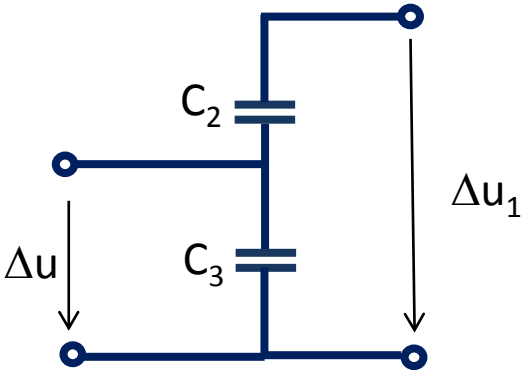




Částečné výboje

- Dále předpokládejme, že napětí u_1 dosahlo zapalovacího napětí (sepnutí spínače) a dojde k uvolnění náboje $\Delta q_1 = \Delta u_1 C_1$

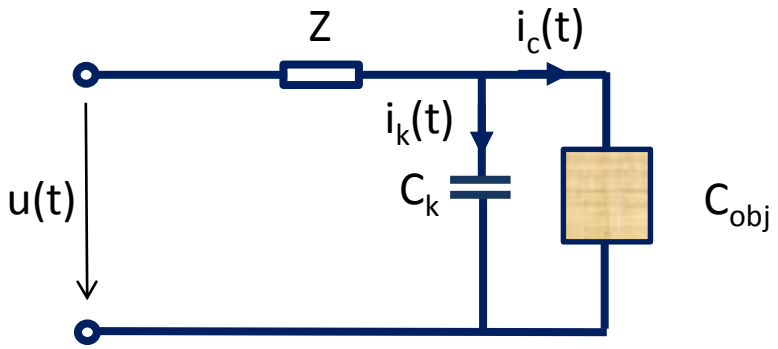
- Situaci při redistribuci náboje lze ukázat na náhradním obvodu



$$\Delta u(t) = \frac{C_2}{C_3 + C_2}\,\Delta u_1(t) = \frac{C_2}{C_3 + C_2}\frac{\Delta q_1}{C_3}$$

Částečné výboje

- Napěťový pokles Δu lze měřit, nicméně kapacity C_2 a C_3 obvykle nejsou známé proto nelze stanovit Δq_1
- Dále předpokládejme, že měřený objekt je připojen k napěťovému zdroji, kde kapacita C_k je vazební kondenzátor a C_{obj} kapacita testovaného objektu



Částečné výboje

- Impedance Z zabraňuje průchodu impulzních proudů a ty jsou pak omezeny pouze kapacitami C_k a C_{obj}
- Při částečném výboji napětí na testovaném objektu poklesne o Δu, kdy pokles napětí je kompenzován energií z kapacity C_k

Částečné výboje

Náhradní kapacitu C_{obj} lze při zanedbání kapacity C_1 (velmi malá) vyjádřit jako:

$$C_t \approx C_2 + C_3$$

Dále předpokládejme

$$C_k >> C_{ob}$$

Uvolněný náboj je poté:

$$q \approx (C_2 + C_3)\Delta u$$

Částečné výboje

Je-li:

$$\Delta u(t) = \frac{C_2}{C_3 + C_2} \Delta u_1(t)$$

$$\Delta u(t) = \frac{q}{C_3 + C_2}$$

Pak:

$$\frac{q}{C_3 + C_2} = \frac{C_2}{C_3 + C_2} \Delta u_1(t)$$

$$q = C_2 \Delta u_1(t)$$

Částečné výboje

- Náboj q označujeme jako zdánlivý náboj, tento náboj není rovný lokálnímu náboji $C_1\ \Delta u_1$.
- Tato hodnota náboje je více realistická než výpočet Δu (q je nezávislý na C_3 na rozdíl od Δu)

Částečné výboje

- Ve skutečnosti podmínka $C_k >> C_t$ není splněna
- Vztah mezi měřeným nábojem q_m a zdánlivým nábojem q lze odvodit jako

$$\frac{q_m}{q} = \frac{C_k}{C_k + C_{obj}}$$

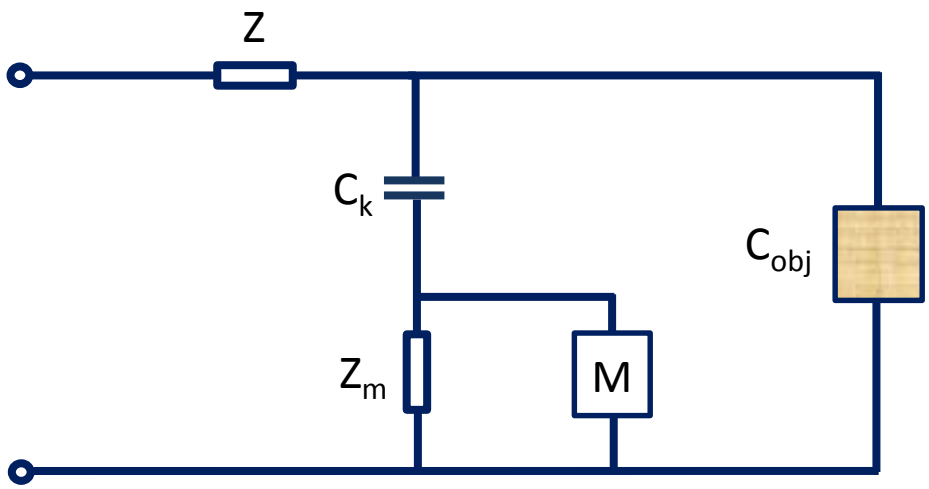
- Pro co nejcitlivější měření by vazební kapacita C_k měla být co největší vzhledem k C_{obj}

Měření částečných výbojů

- Pro transformátory se provádí téměř vždy spolu se zkouškou indukovaným výdržným napětím
- Dva typy měření
  - Globální měření – měří se v celém zařízení nebo v jedné fázi najednou
  - Lokalizační měření – cílem je zjistit místo vzniku částečných výbojů

Měření částečných výbojů

- Základní schéma měření



- Před každým měřením je nutno provést kalibraci obvodu

Měření částečných výbojů

- V závislosti na kapacitách dochází při cestě mezi měřícími svorkami a měřidlem ke zkreslení pulzů ČV
- Vlivem ztrát impedančním nepřizpůsobením dochází ke zmenšení přeneseného náboje
- Kalibrátor produkuje impulzy o skokovém napětí U_0 zapojeného v sérii s kondenzátorem C_0 , takže opakující se impulzy dávají náboj:

$$q_0 = U_0 \cdot C_0$$

Měření částečných výbojů

- Kalibrační impulzy se připojí a měřící obvod při nulovém napájecím napětí
- Naměřené hodnoty se zapíší do kalibrační matice (slouží k odhadu místa vzniku při nepříznivém měření ČV)
- Kalibrační převodní součinitel určíme:

$$K_q = \frac{q_0}{A}$$

kde q_0 je přivedený náboj z kalibrátoru a A je údaj měřícího přístroje

Měření částečných výbojů

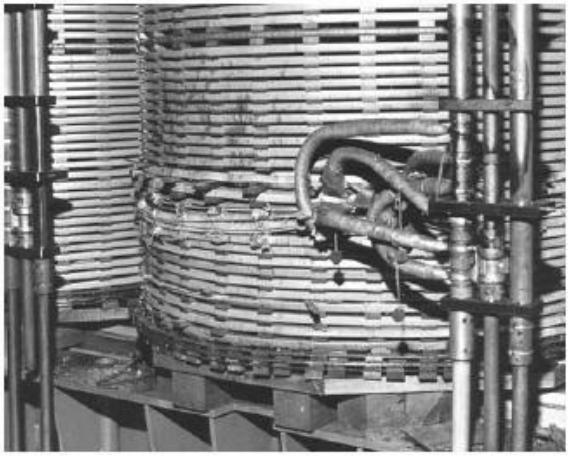
- Výsledkem měření ČV je nejvyšší výsledek součinu naměřeného náboje a kalibračního převodního součinitele
- Měření se provádí postupně zvyšováním a následným snižováním napětí (viz měření indukovaným napětím)
- Požadavek je, že musí být měřeno minimálně na těchto třech napěťových hladinách (min. 5 min setrvání na měřené hladině)
  - pod jmenovitým napětím
  - při jmenovitém napětí
  - při 110 % jmenovitého napětí

Měření částečných výbojů

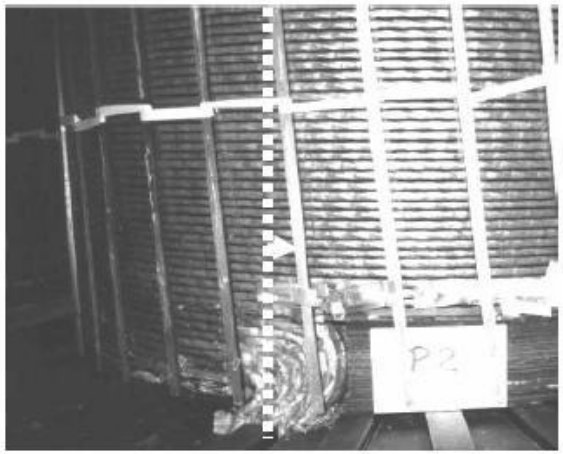
- Výsledek zkoušky je pozitivní pokud se splní následující kritéria během jednohodinové periody měření:
  - Nedojde k prudkému poklesu zkušebního napětí
  - Žádná z hladin úrovní ČV nepřekročí 250 pC
  - Úrovně ČV nebudou vykazovat rostoucí trend a v posledních 20 min nebude v úrovních žádný prudký nárůst
  - Měřené úrovně ČV se nezvýší o více než 50 pC
  - Úroveň ČV naměřená na napěťové hladině $1{,}2 x U_r / \sqrt{3}$ nepřekročí 100 pC

Metody frekvenčních charakteristik (FRA) pro detekci poruch vinutí

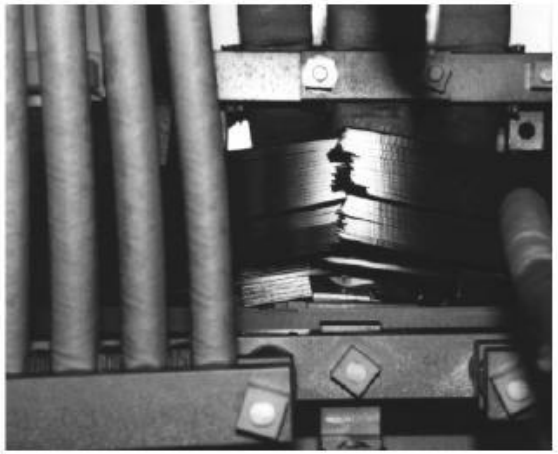
a) Radiální vybočení vnitřního vinutí



b) Naklopené vodiče vinutí



c) Natočení vinutí nižšího napětí do spirály



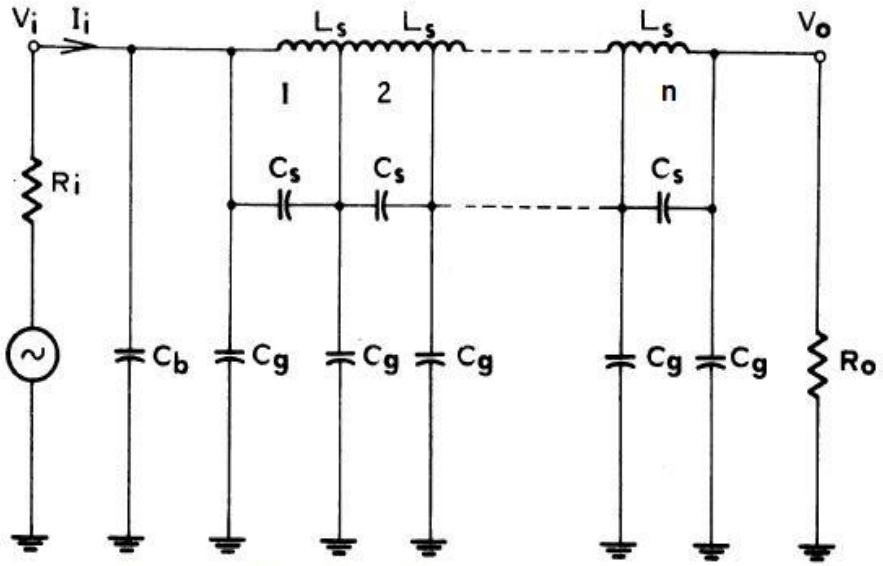
d) Kolaps vinutí na konci podpěry

FRA metody pro detekci poruch vinutí

- Frekvenční odezva transformátorů
  - Elektromagnetické vazby vinutí výkonových transformátorů uvnitř nádoby lze zjednodušeně popsat jako strukturu vlastních indukčností jednotlivých závitů vinutí, vzájemných indukčností mezi sousedními závity, kapacit vinutí k uzemněným částem transformátoru a kapacit mezi jednotlivými částmi vinutí
  - Vinutí výkonových transformátorů představuje systém, který lze zkoumat metodami teorie obvodů

FRA metody pro detekci poruch vinutí

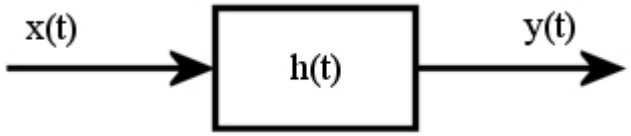
- Schéma náhradního zapojení vinutí transformátoru



Cs - mezizávitová kapacita
Cg - kapacita vinutí vůči pouzdru
Cb - kapacita výstupu vinutí
Ls - indukčnost vinutí
Ri - vstupní odpor
Ro- výstupní odpor

FRA metody pro detekci poruch vinutí

- Časová oblast

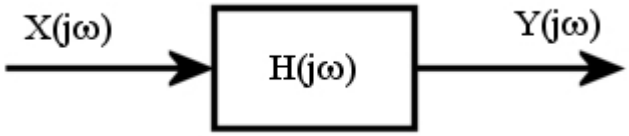


  - *x(t)* je vstupní signál, *h(t)* je impulzní odezva a *y(t)* je výstupní signál
  - Vztah mezi vstupním a výstupním signálem je dán výrazem

$$y(t) = x(t) \cdot h(t)$$

FRA metody pro detekci poruch vinutí

- Frekvenční oblast

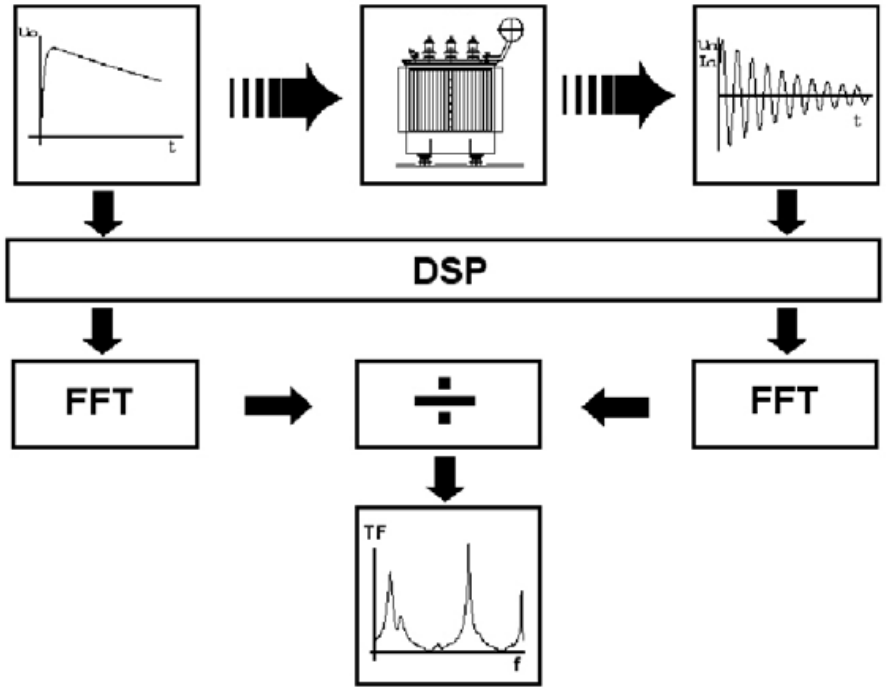


  – Frekvenční odezva *H(jω)* (přenosová funkce), obraz vstupního signálu označme *X(jω)*, obraz výstupního signálu *Y(jω)*.
  – Nyní je vztah mezi veličinami dán výrazem

$$Y(j\omega) = X(j\omega) \cdot H(j\omega)$$

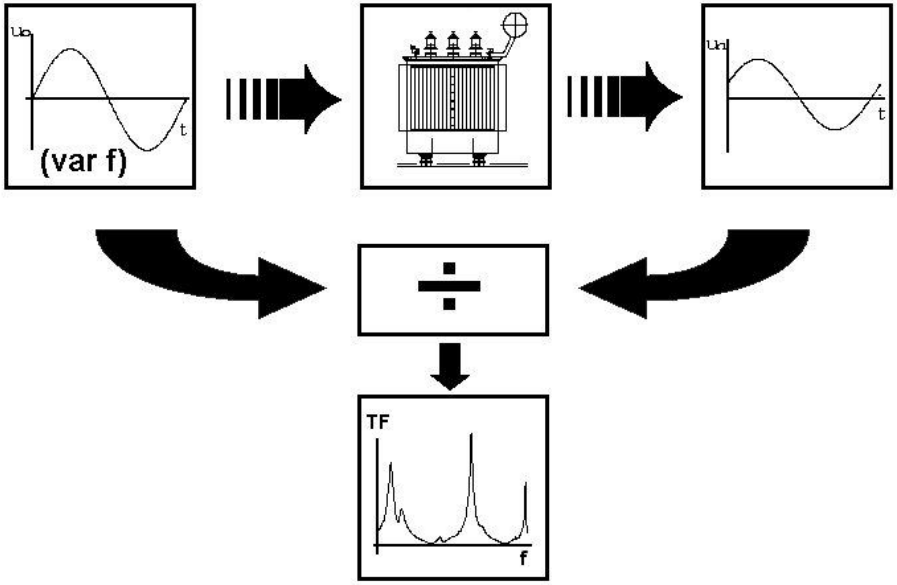
FRA metody pro detekci poruch vinutí

- Zjišťování frekvenční odezvy v časové oblasti – Metoda nízkonapěťových impulzů (LVIM)



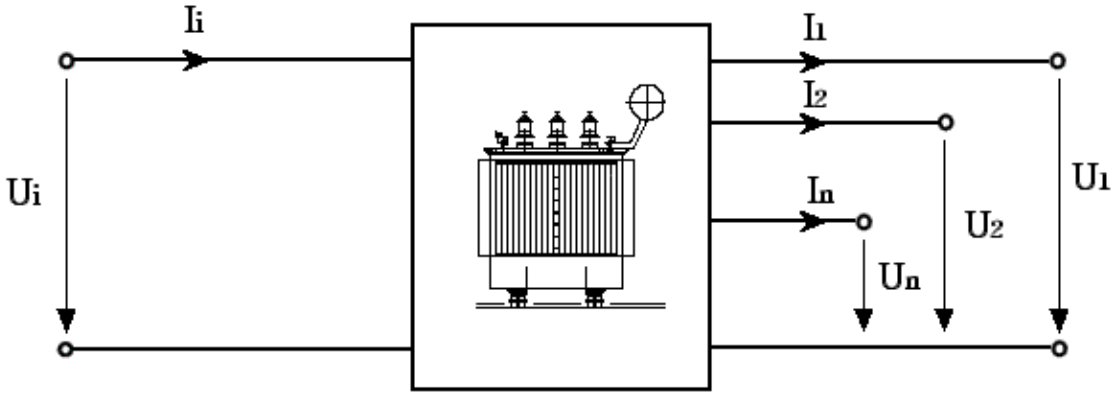
FRA metody pro detekci poruch vinutí

- Zjišťování frekvenční odezvy ve frekvenční oblasti – Metoda analýzy frekvenčních charakteristik (SFRA)



FRA metody pro detekci poruch vinutí

- Transformátor jako dvojbran



- Přenos lze vyjádřit následujícími rovnicemi

$$TF_i = \frac{I_i(f)}{U_i(f)}, TF_{C,n} = \frac{I_n(f)}{U_i(f)}, TF_{V,n} = \frac{U_n(f)}{U_i(f)}$$

FRA metody pro detekci poruch vinutí

- Každá změna polohy vinutí nebo izolačního systému transformátoru sebou nese změnu kapacity, indukčnosti a rezistivity, tedy změnu uvnitř systému, jejímž následkem je změna tvaru přenosové funkce
  - Z tohoto důvodu je nutné zachovávat při všech měřeních daného transformátoru stejný stav přepínače odboček – obvykle nastavený na odbočku maximálního napětí
- Každá změna polohy vinutí nebo izolačního systému

FRA metody pro detekci poruch vinutí

- Frekvenční charakteristiky
  - Přenosovou funkci lze graficky vyjádřit pomocí frekvenčních charakteristik (Bodeho diagram)
  - Nejčastěji vynášíme amplitudu v závislosti na frekvenci

$$G(f) = 20log\left(TF_{V,n}\right)$$

  - Fázová charakteristika se zatím při této metodě příliš nevyužívá
  - Měří se asi ve frekvenčním rozsahu 20 Hz – 2MHz

FRA metody pro detekci poruch vinutí

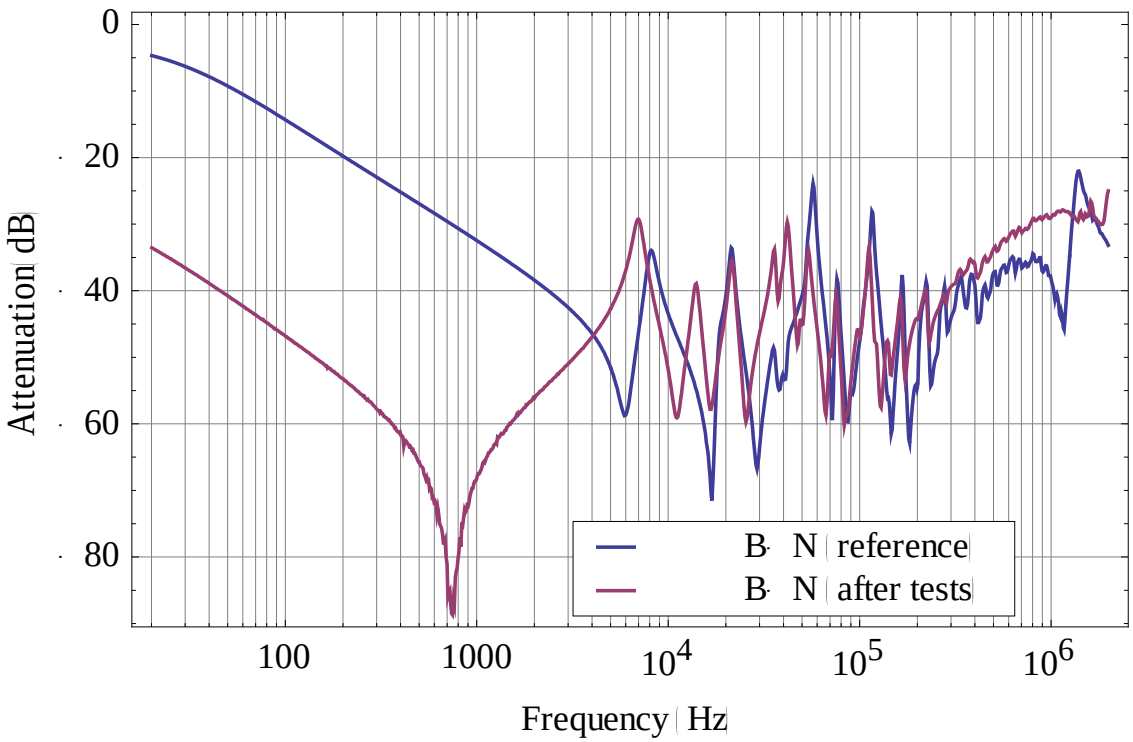
- Postup měření
  - Dnes se měří plně automatizovaným systémem
  - Postupně se měření provádí pro každou fázi vůči vyvedené nule (pokud je) nebo vzájemně mezi všemi fázemi dané strany
  - Měří se vždy série s otevřeným neměřeným vinutím i série se zkratovaným neměřeným vinutím
  - Tyto série měření se realizují pro vstupní vinutí i všechna výstupní vinutí

FRA metody pro detekci poruch vinutí

- Vyhodnocení měření
  - Je nutné mít referenční měření – aktuální se s ním porovnává (detekují se rozdíly průběhů)
  - Některé akceptovatelné rozdíly jsou způsobené změnou nasycení jádra, jiné zanedbatelným posunem vinutí
  - Různé průběhy mají měření při otevřeném obvodě a při zkratovaných svorkách neměřeného vinutí
  - Pro vyhodnocení je potřeba zkušeného odborníka, který je schopen detekovat specifikovat případnou poruchu a její lokalizaci

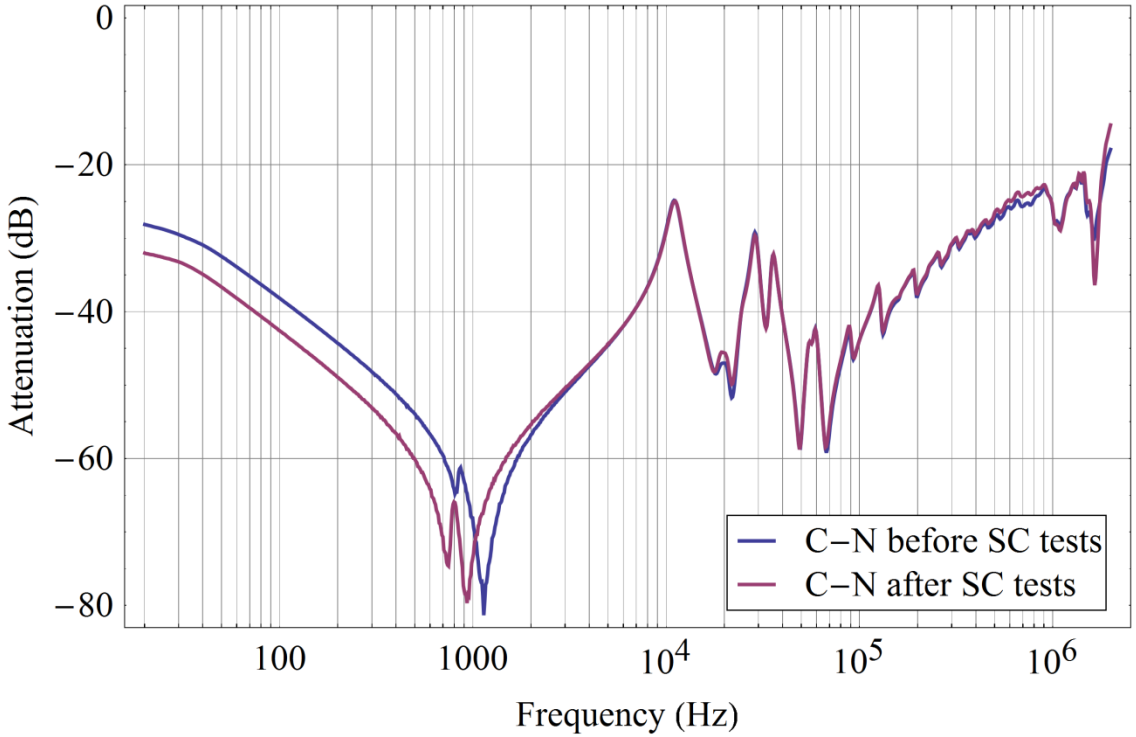
FRA metody pro detekci poruch vinutí

- Příklady měření – zjištěna porucha



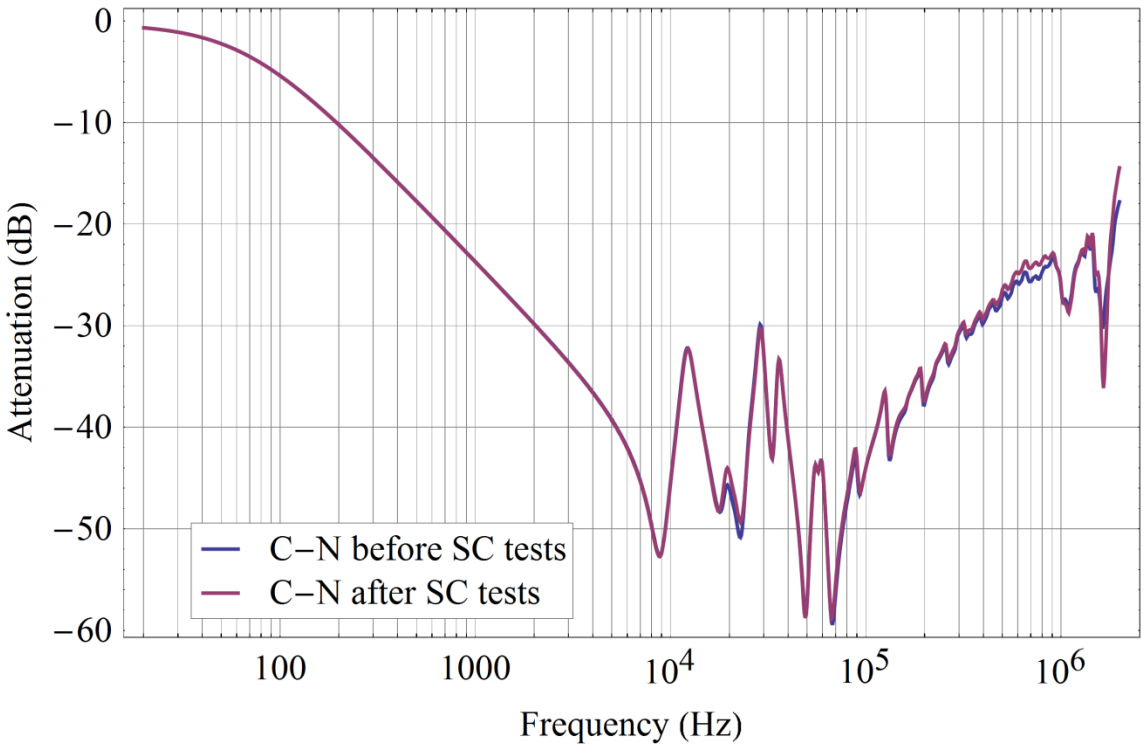
FRA metody pro detekci poruch vinutí

- Příklady měření – porucha nezjištěna



FRA metody pro detekci poruch vinutí

- Příklady měření – porucha nezjištěna

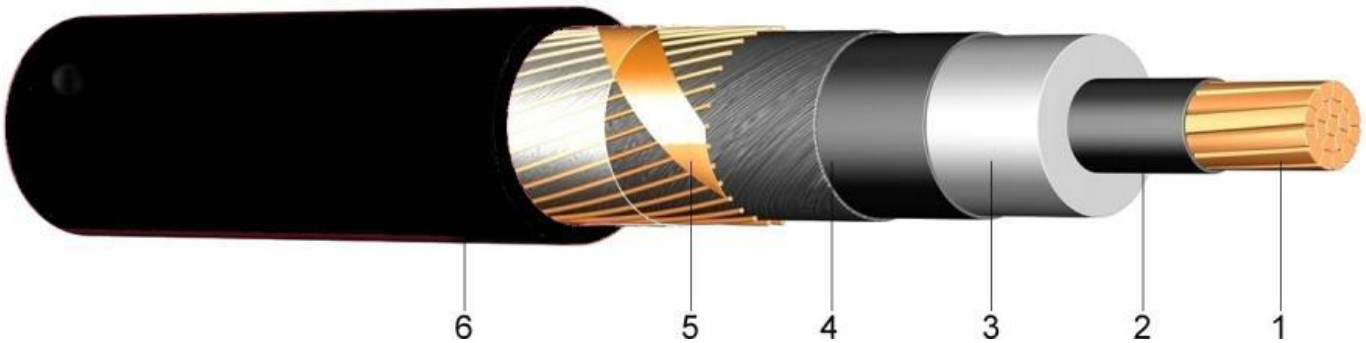


Další diagnostické metody pro výkonové transformátory (tlumivky)

- Měření převodu, měření napětí a ztrát naprázdno, měření napětí a ztrát nakrátko
- Kontrola funkce přepínače odboček
- Kontrola sledu fází a určení hodinového úhlu
- Měření teplot vinutí, oleje, …
- Hluková zkouška
- Klimatické zkoušky
- Zkratová zkouška, měření reaktance vinutí
- Mechanické zkoušky nádoby (tlaková, rázová, …)
- …

Vysokonapěťové kabely

- Dva základní typy dle izolace
  - s olejem impregnovaným papírem (PILC)
  - se zesíťovaným polyetylenem (XLPE)
- Příklad VN kabelu N2XS2Y



1… Kulatý, laněný měděný vodič

2… Vnitřní polovodivá vrstva

3… Izolace ze síťovaného polyetylenu (XLPE)

4… Vnější polovodivá vrstva

5… Měděné stínění s protisměrnou spirálou

6… Vnější polyetylenový plášť (PE)

Vysokonapěťové kabely

- Podmínky a typické rysy při zkoušení VN kabelů
  - V porovnání s jinými zařízeními mají kabely obrovskou kapacitu
  - Zkoušky se nesmí zahájit dříve než 24 h po montáži na kabelovou zkušební smyčku
  - Pokud není uvedeno jinak, všechny uzemněné části musí být připojeny ke stínění kabelu
  - Teplota okolí musí být 20 ± 15 °C

Výčet hlavních diagnostických metod pro vysokonapěťové kabely

- Měření odporu jádra (případně teplotní závislost)
- Měření izolačního odporu a svodového proudu na stínění
- Ztrátový činitel
- Napěťové zkoušky
  - Výdržným napětím
  - Spínacím a atmosférickým impulzem
  - Měření částečných výbojů
- Detekce a lokalizace poruchy instalovaného kabelu

Měření izolačního odporu

- Izolační odpor se měří stejnosměrným napětím na vzorku min. 5 m dlouhém a před jakoukoli napěťovou zkouškou
  - Bylo zjištěno, že DC namáhání XLPE kabelů ovlivňuje nepříznivě jejich životnost = > nahrazeno AC napětím o nízké frekvenci
  - Měřící napětí by zdaleka nemělo překročit jmenovitou hodnotu napětí kabelu
- Měření se provádí pomocí klasické můstkové metody, dnes většinou přístroji pro přímé měření odporu

Měření izolačního odporu

- Měří se mezi jádrem a stíněním, případně pancířem
- Pokud je kabel nebo žíla bez stínění a pancíře, tak se kabel ponoří do vody o předepsané teplotě a měří se mezi jádrem a vodou
- Ve vodě musí být kabel před měřením ponořen min. 1 h
- Při měření musí být dosáhnuto ustálení měřícího systému (doba zatížení je 1 – 5 min.)

Měření izolačního odporu

- Objemový odpor se vypočte z měření izolačního odporu dle vztahu:

$$\rho = \frac{2\pi l R}{ln\frac{D}{d}} \quad (\Omega\, cm)$$

kde l je délka kabelu nebo žíly ve vodě v cm,

R je změřený izolační odpor,

D je změřený vnější průměr izolace nebo pláště v mm,

d je změřený vnitřní průměr izolace nebo pláště v mm

Měření svodového proudu na stínění

- Kovová fólie o rozměrech 50 x 50 mm se připevní bez jakýchkoli vzduchových mezer k vnějšímu stínění nebo pancíři kabelu co možno nejdále od místa připojení k zemi
- Kovová folie se poté uzemní přes miliampérmetr a rezistor 2000 Ω
- Svodový proud se měří zkušebním AC napětím rovnému jmenovitému

Měření ztrátového činitele *tg* δ

- U kabelů se měří závislost *tg* δ na teplotě nebo na napětí
- Případná změna teploty se vytváří ponořením kabelu do vody (následným ohříváním nebo chlazením vody) nebo do sušárny nebo průchodem proudu jádrem, stíněním či obojím
- Při měření závislosti na napětí se měří při konstantní okolní teplotě a výsledek se násobí tabulkovým teplotním korekčním koeficientem

Měření ztrátového činitele *tg* δ

- Měřící napětí U_0 se přikládá mezi jádro a stínící vrstvu nebo plášť ($U_0 \geq 2$ kV)
- *tg* δ se měří při: $0{,}5U_0$, U_0 , $2U_0$
- Ostatní parametry a postup měření je stejný jako u měření na transformátoru
- Z naměřených hodnot lze vypočíst kapacitu kabelového vzorku jako u transformátoru a následně ji přepočíst na délkovou jednotku

Napěťové výdržné a impulzní zkoušky

- Kontrola a ověření elektrické pevnosti izolace jádra kabelu vůči zemi a u vícežilových kabelů vůči ostatním jádrům
- Kontrola a ověření elektrické pevnosti izolace dalších komponent kabelových souborů (spojky, koncovky, …)
- Viz přednáška na napěťové zkoušky!
- Bylo zjištěno, že DC namáhání XLPE kabelů ovlivňuje nepříznivě jejich životnost = > nahrazeno AC napětím o nízké frekvenci

Měření částečných výbojů

- Je požadováno pouze pro kabelové soubory s typem izolace XLPE (ne pro kabely s papírovou izolací)
- Postup a vyhodnocení měření je stejné jako u měření na transformátorech

Detekce a lokalizace poruchy instalovaného kabelu

- Poruchy se dělí na nízkoohmové a vysokoohmové
- Nízkoohmové poruchy mají velmi malý odpor (desítky či jednotky Ω)postižené fáze vůči zemi či ostatním fázím, způsoben je spojením fází, spečením fází nebo spečením stínění jednotlivých žil
- Vysokoohmové poruchy mají velmi vysoký odpor (stovky kΩ) postižené fáze vůči zemi či ostatním fázím, způsoben je elektrickým nebo mechanickým proražením izolace postižené fáze

Detekce a lokalizace poruchy instalovaného kabelu

- Detekce poruchy se tedy zjistí vn impulzem (viz napěťové zkoušky)
- Druh poruchy lze odhadnout změřením odporu
- Lokalizace poruchy se provádí pomocí echometrie = zaznamenání odrazů šířících se vln
- Toto měření je vhodné provést z obou stran vedení

Detekce a lokalizace poruchy instalovaného kabelu

- Echometrie je velice citlivá na změny impedance (lehce se zamění např. spojka za poruchu)
- Díky tomu lze zjistit a lokalizovat pouze výrazné poruchy (přerušení fáze nebo spojení fází)
- Z výše uvedených důvodů je také nutné dobře znát historii dané kabelové trasy

Detekce a lokalizace poruchy instalovaného kabelu

- Princip echometru = šíření a odraz vlny
  - Vlna se šíří prostřednictvím hmotných částic, které kmitají kolem rovnovážné polohy
  - Pohyb se pružně přenáší z jedné částice na druhou
  - Pro nastavení echometru a tím správnému určení délky kabelu a lokalizace poruchy je nutné znát rychlost šíření vlny v měřeném kabelu

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}}$$

kde c je rychlost světla a ε_r je relativní permitivita

Detekce a lokalizace poruchy instalovaného kabelu

- Odraz vlny nastává vždy na rozhraní dvou prostředí (rozdílných svojí impedancí)

Tvrdý odraz
(zkratovaná žíla)

Volný odraz
(přerušená žíla)

Detekce a lokalizace poruchy instalovaného kabelu

- Když se nepodaří poruchu pomocí echometru lokalizovat, musí se místo poruchy upravit
  - K tomu se používá tzv. propalovací transformátor s plynule řiditelným napětím a proudovou hustotou
  - Připojením k poškozené žíle způsobíme hoření oblouku v místě poruchy
  - Poté dojde ke zvýšení odporu (zvětšení mezery mezi žilami upálením) nebo ke snížení odporu (vytvořením vodivého uhlíku či svařením kabelu)
  - Následně je již porucha obvykle lokalizovatelná

Detekce a lokalizace poruchy instalovaného kabelu

- Echometrem se určí pouze přibližné místo poruchy, přesné dohledání se provádí zemním mikrofonem
  - Zvukový efekt v místě poruchy se vytváří cykly VN rázů připojených k postižené žíle
- Alternativou je metoda DC proudu (určeno jen pro XLPE kabely, PILC mají vodivé opláštění a tím uzavřený obvod)
  - Voltmetrem se dle výchylky indikuje unikající DC proud v místě poruchy

Další diagnostické metody pro vysokonapěťové kabely

- Zkoušky za zvýšené teploty, teplotními cykly
- Tepelná a dynamické zkratové zkoušky stínění a jádra
- Měření odporů jádra, stínění a pancíře
- Klimatické zkoušky
- Mechanické zkoušky jádra, izolace a celku (ohyb, ráz, tlak, …)
- Zkouška požární odolnosti
- …

Diagnostika transformátorů a kabelů v normách

- Normy pro transformátory

  ČSN EN 60076

  ČSN 35 1086

- Normy pro vysokonapěťové kabely

  ČSN EN 61442

  ČSN 34 7010

  ČSN 34 7405

- Norma pro částečné výboje

  ČSN EN 60270